

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.125>



四川盆地五峰—龙马溪组页岩成熟度研究

王晔^{1,2}, 邱楠生^{1,2*}, 仰云峰^{3,4}, 芮晓庆^{3,4}, 周圆圆^{3,4},
方光建⁵, 吴航^{1,2}, 申宝剑^{3,4}, 程礼军⁵, 腾格尔^{3,4}

1.中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249
2.中国石油大学地球科学学院,北京 102249
3.中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所,江苏无锡 214126
4.页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室,江苏无锡 214126
5.重庆地质矿产研究院重庆市页岩气资源与勘查工程技术研究中心,重庆 400042

摘要:上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组海相页岩是四川盆地下古生界主要的烃源岩和页岩气勘探目标,有机质成熟度不仅是油气生成评价的关键,也是页岩品质评价的重要指标之一。下古生界页岩有机质成熟度一直以来是有机岩石学研究的难点与热点问题。由于下古生界缺乏镜质体,先前的研究多是采用沥青反射率转换为等效镜质体反射率的方法,并且由于沥青的局限性和不确定性,使得五峰—龙马溪组页岩的成熟度缺乏统一的认识和系统研究。通过采集四川盆地及其周缘的岩心和露头样品,系统分析了页岩有机显微组分光学反射率特征。结果表明笔石和固体沥青是最主要的两类有机显微组分。根据固体沥青的显微结构形态和光性特征,将固体沥青大体上分为两类:(1)颗粒状—棱角状的充填在孔隙和微裂缝中高反射率焦沥青;(2)以细小不规则表面的有机质颗粒大量分散于粘土矿物基质中的低反射率基质固体沥青。焦沥青与笔石随机反射率均可以表征下古生界页岩有机质成熟度。但焦沥青反射率略低于笔石反射率,并且随着成熟度的增高,笔石反射率的增速大于焦沥青,各向异性也显著增强。相对于固体沥青反射率,笔石随机反射率分布更为集中,更适合作为含笔石页岩有机质成熟度指标。但是笔石反射率与等效镜质体反射率在过成熟阶段的换算关系需要进一步研究。

关键词:四川盆地;五峰—龙马溪组页岩;笔石;固体沥青;热成熟度;等效镜质体反射率;石油地质。

中图分类号: P618.12 文章编号: 1000-2383(2019)03-0953-19 收稿日期: 2018-09-14

Thermal Maturity of Wufeng-Longmaxi Shale in Sichuan Basin

Wang Ye^{1,2}, Qiu Nansheng^{1,2*}, Yang Yunfeng^{3,4}, Rui Xiaoqing^{3,4}, Zhou Yuanyuan^{3,4},
Fang Guangjian⁵, Wu Hang^{1,2}, Shen Baojian^{3,4}, Cheng Lijun⁵, Tenger^{3,4}

1.State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China
2.College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China
3.Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC Petroleum Exploration and Production Research Institute, Wuxi 214126, China
4.State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Wuxi 214126, China
5.Chongqing Engineering Research Center for Shale Gas Resource & Exploration, Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing 400042, China

Abstract: The marine shale of Upper Ordovician Wufeng Formation (O_3w)-Lower Silurian Longmaxi Formation (S_1l) is the

基金项目:国家自然科学基金项目(Nos. 41690133, U1663202);国家科技重大专项(Nos. 2016ZX05007-003, 2017ZX05036-002, 2017ZX05005001);北京市科技领军人才培养工程项目(No.Z171100001117163)。

作者简介:王晔(1988—),男,博士研究生,主要从事有机岩石学与盆地热史研究。ORCID:0000-0002-7510-7553. E-mail: wy3519886@qq.com

*通讯作者:邱楠生,ORCID:0000-0001-8092-0410. E-mail: qunsh@cup.edu.cn

引用格式:王晔,邱楠生,仰云峰,等,2019.四川盆地五峰—龙马溪组页岩成熟度研究.地球科学,44(3): 953—971.

main source rock and the target of shale gas exploration in Sichuan Basin. Organic matter maturity is not only the key to evaluate hydrocarbon generation, but also a vital indicator of shale quality evaluation. The maturity of organic matter in Lower Paleozoic shale has always been a difficult and hot issue in organic petrology. However, the previous studies were focused on the conversion of solid bitumen reflectance to equivalent vitrinite reflectance on account of the lack of vitrinite in Lower Paleozoic stratum. And the limitation and uncertainty of bitumen give rise to a lack of uniform understanding and systematic research of Wufeng-Longmaxi shale on thermal maturity. The core and outcrop samples of Wufeng-Longmaxi shale were collected in Sichuan Basin and its periphery areas for optical analysis of organic matter. The macerals and optical characteristics of various organic matter in Wufeng-Longmaxi shale were analyzed. The main macerals organic components are composed of the graptolite fragments and solid bitumen. Two types of solid bitumen have been distinguished in shales, based on optical properties and microstructure characteristics in reflected light: (1) pyrobitumen—a highly reflecting granular and sharp angular bitumen accumulates in intergranular pore spaces and microfractures; (2) matrix solid bitumen—an irregular granular surface and finely organic matter particle widely disseminated in the clay mineral matrix with low reflectance. The random reflectance of pyrobitumen is slightly lower than that of graptolite in the same sample. The increase of graptolite reflectance is faster than that of solid bitumen with the increase of maturity, and anisotropy increases significantly. Both pyrobitumen and graptolite can be used for maturity analysis in Lower Paleozoic shale. Compared to the reflectance of solid bitumen, the random reflectance of graptolite is more suitable as maturity index due to reflectance value show a narrower range. However, its relationship with vitrinite reflectance at overmature stage still needs further study.

Key words: Sichuan Basin; Wufeng-Longmaxi shale; graptolite; solid bitumen; thermal maturity; equivalent vitrinite reflectance; petroleum geology.

全球广泛分布的上奥陶一下志留统富有机质笔石页岩是一套全球性海相优质烃源岩(Lüning *et al.*, 2000).北非和中东地区称之为“热页岩”(hot shale),中国南方称之为五峰组—龙门溪组(O_3w-S_1l)黑色笔石页岩.上奥陶统五峰组一下志留统龙门溪组页岩是四川盆地页岩气勘探和主力产气层(Guo, 2013; 金之钧等, 2016; 翟刚毅等, 2017).有机质成熟度不仅决定生烃演化阶段,也与页岩孔隙度、孔隙结构和含气性密切相关(Zhang *et al.*, 2012; Hao *et al.*, 2013; Mastalerz *et al.*, 2013; 解习农等, 2017).镜质体反射率是目前国际上唯一可对比的成熟度指标(Tissot and Welte, 1984).然而,镜质体来源于志留纪以后高等植物的木质素,因此在下古生界无法使用镜质体反射率(VR_o)这一最常用的有机质成熟度指标,也使得重建早古生代时期的热史缺乏有效的古温标(Qiu *et al.*, 2012; Suárez-Ruiz *et al.*, 2012; Hartkopf-Fröder *et al.*, 2015).因此,在缺乏镜质体的下古生界页岩中,通常是运用沥青反射率转换的等效镜质体反射率进行成熟度评价.但沥青存在多种来源和多期次共存(Suárez-Ruiz *et al.*, 2012; Petersen *et al.*, 2013).在不同的盆地中,沥青反射率与镜质体反射率之间的关系复杂,赋存在不同岩性中的沥青也有差异(Bertrand, 1990, 1993),不同成熟度阶段换算公式也可能不同.并且只有烃源岩中原生沥青才可以作为反射率成熟度指标(肖贤明, 1991).Bertrand(1990)指

出沥青反射率不能作为单一的成熟度指标使用,而对于沥青作为成熟度参数也一直存在一些争议(Suárez-Ruiz *et al.*, 2012), Hackley and Cardott(2016)也指出现有的经验转换公式使用时应当谨慎.为此,本次研究采集四川盆地及其周缘的岩心和露头样品,系统分析五峰—龙门溪组页岩有机质显微组分光学反射率特征,探讨等效镜质体反射率的换算,为页岩气的勘探与评价提供有重要的有机质成熟度信息.

1 地质背景

四川盆地位于扬子地台西北缘,被龙门山、米仓山、大巴山等造山带所围,盆地面积约为 $18 \times 10^4 \text{ km}^2$,是中国最重要的天然气生产区域.四川盆地是在震旦系—中生界被动大陆边缘之上叠加了上中生界—新生界前陆盆地的复合型含油气盆地(何登发等, 2011; Liu *et al.*, 2018).在上元古界变质岩和岩浆岩基底之上沉积了8 000~12 000 m 海相碳酸盐岩和陆相碎屑岩沉积层.在早奥陶世晚期到志留纪,由于华夏与扬子地块之间的板块汇聚作用,四川盆地处于挤压应力环境,盆地性质为克拉通内继承性挤压坳陷盆地,克拉通边缘普遍挤压隆升,整体为受隆起分隔围限的盆地格局.特别是雪峰隆起、川中隆起和黔中隆起出露海平面,使早—中奥陶

世时期由广阔海转变为受古隆起所围限的局限浅海,形成大面积低能、欠补偿缺氧的沉积环境(牟传龙等,2011).受构造运动及海侵的影响,晚奥陶世五峰组沉积时期沉积了一套稳定的笔石相薄层黑色页岩(Chen et al.,2000),岩性主要为硅质页岩、硅质岩,分布范围广,厚度为一般不超过30 m.下志留统龙马溪组页岩的岩性主要为黑色硅质岩、碳质页岩和深灰色泥岩,局部夹粉细砂岩,厚度为30~120 m,主要分布在川南、鄂西—渝东和川东北等地(聂海宽等,2012).五峰—龙马溪组页岩TOC分布在0.4%~18.4%,平均为2.5%,TOC大于2%的高丰度页岩段主要发育在五峰组和龙马溪组的底部(Dai et al.,2014).TOC含量向上随着砂质含量的增多而减小(梁狄刚等,2008).干酪根显微组分以无定形体、藻类和腐泥体占优势(>70%),干酪根碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-29.8‰~ -26.9‰(Li et al.,2016),有机质类

型为II型,有机质主要由无定型有机质、浮游藻类、疑源类、细菌和笔石等成烃生物和大量固体沥青组成(腾格尔等,2017).总体来看,五峰—龙马溪组黑色页岩分布在黔中古隆起、雪峰山隆起和川中古隆起之间的区域,具有分布面积大、范围广的特征,页岩分布面积超过 $10 \times 10^4 \text{ km}^2$,但埋深小于4 000 m的面积只有近 $5 \times 10^4 \text{ km}^2$ (Dai et al.,2016).

2 样品和方法

本次研究共采集四川盆地及周缘富含笔石五峰—龙马溪组页岩的18口页岩气井的32个岩心样品和18个露头的22个样品(共计54个)(图1).将样品切割成两部分,分别用于TOC测试、反射率全岩样品的制备.所有的样品均垂直层面切割,随后置入环氧树脂冷凝固化,等完全固化之后进行研磨和抛光.

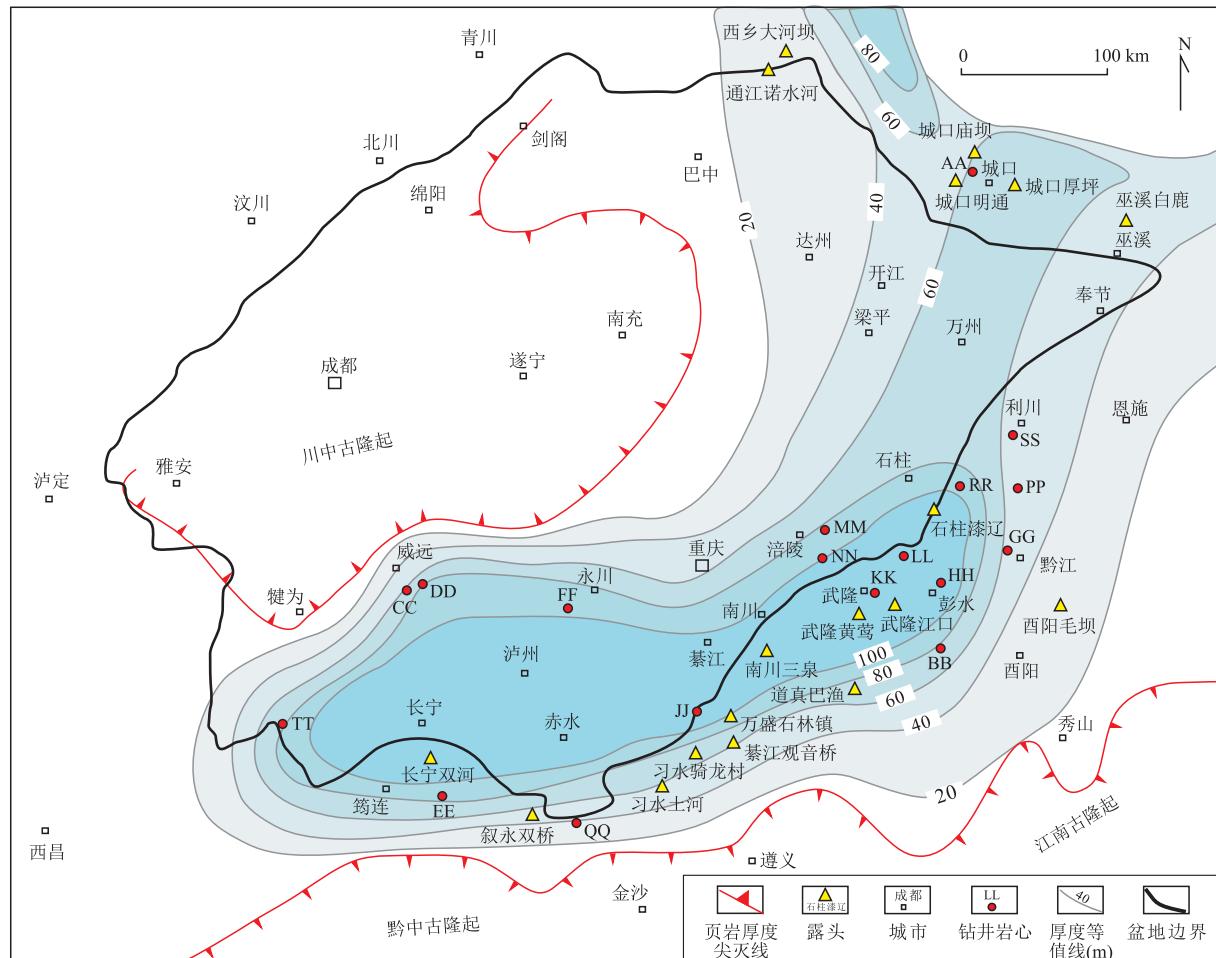


图1 四川盆地及其周缘岩心和露头样品分布

Fig.1 Sample locations of wells and outcrops investigated in the Upper Ordovician Wufeng and the lower part of Lower Silurian Longmaxi Formation in Sichuan Basin and its periphery

上奥陶统五峰组和下志留统龙马溪组下段页岩厚度分布,据郭彤楼和张汉荣(2014)修改

在 Leica DM4500P 偏光显微镜反射光油浸 50 倍物镜下对全岩光片进行有机岩石学分析。显微组分随机反射率测试根据标准 SY/T5124-2012 在 Leica DM4500P 偏光显微镜反射光 50 倍物镜搭载 MPS200 光度计 546 nm 波长油浸下进行测试。依据样品反射率实际情况, 测试前分别用标样钇铝石榴石 ($R_o=0.90\%$)、钆镓石榴石 ($R_o=1.72\%$)、立方氧化锆 ($R_o=3.17\%$) 和金刚石 ($R_o=5.21\%$) 进行校正。总有机碳测试利用 LECO CS230 碳硫分析仪, 依据标准为 GB/T 19145-2003, 分析测试在中石化石油勘探院无锡石油地质研究所完成。

3 结果与讨论

3.1 有机质光性特征

页岩全岩光片观察结果显示, 笔石、固体沥青、几丁虫和大量分散无定形态有机质分散于矿物基质中。其中笔石碎片和固体沥青是含量最多的 2 类有机显微组分(图 2), 除此之外只在个别样品中观察到几丁虫(图 2a、2b)。几丁虫表现为花瓶状(Tricker *et al.*, 1992)。

3.1.1 笔石 早期在反射光下对笔石碎片的特征已有详细的研究(Link *et al.*, 1990; Goodarzi *et al.*, 1992)。与固体沥青相比, 笔石颗粒尺寸较大, 具有非颗粒状(板条状)和颗粒状两种表现形态(Suchý *et al.*, 2002; Petersen *et al.*, 2013)。非颗粒状笔石通常呈碎片状分散于矿物基质中, 拥有纤维状结构或纺锤层结构(Goodarzi *et al.*, 1992), 分段出现(图 2c、2d、2h、2k、2o、2s)。颗粒状笔石(图 2l、2q)表面粗糙反射率低, 各向异性弱;而非颗粒状笔石反射率高, 有明显双轴光性和强烈的各向异性(Riediger *et al.*, 1989), 并且随着成熟度的增大, 各向异性也明显增强(Rantitsch, 1995)。在单偏光下, 旋转物台 360°可以观察到非颗粒状笔石两明两暗的“消光现象”。值得注意的是, 在测试样品中可能观察到笔石被沥青侵染的现象(图 2c、2g、2k), 这会导致笔石反射率明显偏低(Goodarzi *et al.*, 1992)。因此, 本文没有测试这类笔石随机反射率。而真正最大反射率值是由平行层面所切片光面上所获得的(Goodarzi and Norford, 1985)。非颗粒的碎片可能来源于笔石外骨骼的残骸, 颗粒碎片可能由笔石软体的部分(公共管道)形成(Goodarzi and Norford, 1985; Riediger *et al.*, 1989)。它们也可能为表皮外层组成的皮质组织(Link *et al.*, 1990)。非颗粒笔石

胞管中常充填莓球状黄铁矿(图 2h), 偶见整个笔石被草莓状黄铁矿全部取代, 这可能是在成岩早期硫酸还原菌的迹象(Haeri-Ardakani *et al.*, 2015)。非颗粒状笔石碎屑主要分布于页岩中, 而颗粒状笔石普遍存在于碳酸盐岩中。在五峰—龙马溪组页岩中也观察到非颗粒状笔石要明显多于颗粒状笔石, 少数情况下, 这两类笔石随机反射率测试结果几乎相同, 但总体上非颗粒笔石反射率高于颗粒状笔石反射率, 这与先前的认识一致(Goodarzi *et al.*, 1992; Suchý *et al.*, 2002)。

3.1.2 固体沥青 固体沥青作为一种次生的显微组分, 在同一样品中, 其聚集模式可表现出多样性(如散布基质、颗粒状、纳米多孔、微粒体、均质团块等)(Sanei *et al.*, 2015)。根据五峰—龙马溪组页岩中固体沥青的显微结构形态和光性特征, 可以将固体沥青大体上分为两类:一类是颗粒状—棱角状的高反射率固体沥青(图 2f、2n);另一类是以细小的有机质颗粒大量分散于粘土矿物基质中的低反射率固体沥青(图 2j), 也称作基质固体沥青。为了方便统计反射率测试结果, 笔者将其分别命名为颗粒—棱角状固体沥青 Type A 和基质固体沥青 Type B。低反射率的基质沥青可能与藻类有关(Bertrand and Héroux, 1987)。颗粒—棱角状沥青以焦沥青的形式存在(图 2f、2n), 表面较笔石粗糙, 多见充填于孔隙或矿物颗粒边缘(图 2e、2i、2m), 具有明显内部结构及尖锐的轮廓和明显的马赛克镶嵌结构(图 2f、2n)。基质固体沥青呈弥散状, 或丝状、条带状、絮状等无定形体形态, 主要分布在裂隙或孔隙中, 其形态随孔隙形态发生变化, 也可作为细粒的网状散布在基质中。基质沥青局部也可见其裂解成为棱角状高反射率微粒体的残余产物。微粒体呈现极其细小的颗粒密集组合在一起形成了颗粒集合体(图 2j)。随着成熟度的增大, 微粒体也表现出含量增多、微粒化程度变强的特征。

3.2 有机显微组分随机反射率分析

表 1 和表 2 为本次研究固体沥青和笔石的反射率测试结果。事实上, 并不是每一个样品都可以获取到这两类沥青的反射率值。固体沥青的聚集模式与岩性组成有密切关系。其中, 基质固体沥青存在于纳米孔隙中, 表面不规则。在富含粘土质的页岩中, 可以观测到这类基质沥青的含量较多。由于基质沥青多分散在粘土矿物基质中, 表现出多孔和矿物干扰的现象, 这样的沥青反射率会对成熟度造成误差。因此, 基质沥青不是测量沥青反射率的合适组分。五峰—龙马溪组页岩笔石平均随机反射率分布在

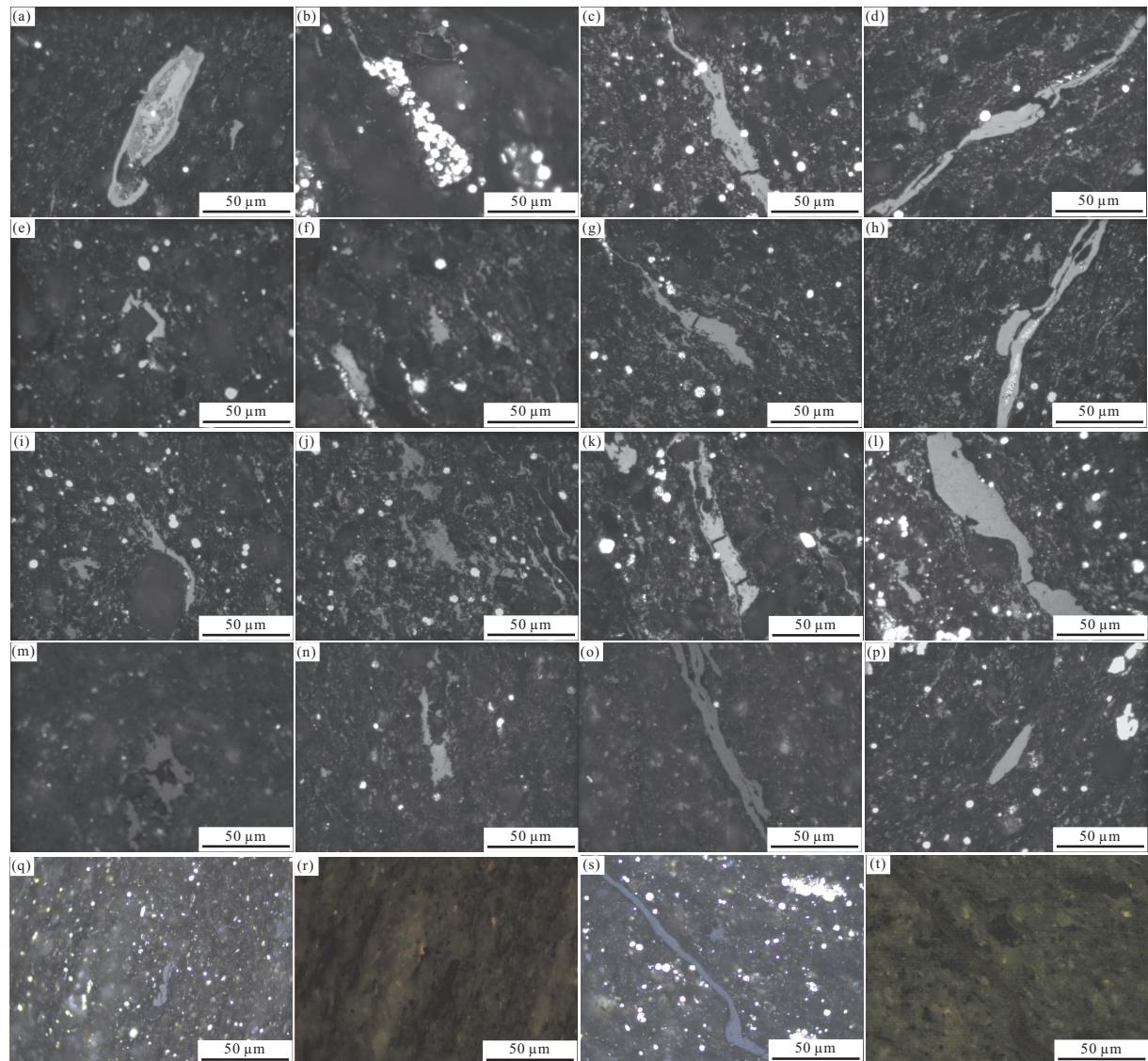


图2 显微组分照片(油浸,反射白光,×50)

Fig.2 Microphotographs of macerals (oil immersion, white reflected light, $\times 50$)

a.几丁虫,空腔中可能充填莓球状黄铁矿和固体沥青(NN, 2 609.35 m);b.几丁虫,空腔中充填莓球状黄铁矿(BB, 1 247.1 m);c.非颗粒状笔石可能被沥青浸染(FF-2, 3 860 m);d.非颗粒笔石,典型的纤维状结构和纺锤层(RR-3, 4 515.5 m);e.固体沥青,附着在碳酸盐岩矿物颗粒边缘(FF-1, 3 813.6 m);f.固体沥青颗粒(MM-2, 2 535.31 m);g.颗粒状笔石可能被沥青浸染(CC-2, 3 722.18 m);h.非颗粒笔石,笔石胞管中充填莓球状黄铁矿(KK-1, 2 825.2 m);i.固体沥青,附着在矿物颗粒边缘(FF-2, 3 860 m);j.低反射率固体沥青基质(FF-2, 3 860 m);k.条带状笔石,笔石两边附着物可能为固体沥青(LL, 750 m);l.颗粒状笔石,表面粗糙(CC-1, 3 711.9 m);m.固体沥青,充填于孔隙中(城口庙坝露头);n.颗粒状固体沥青,表现出强烈的各向异性和马赛克结构(石柱漆辽露头);o.条带状笔石(城口庙坝露头);p.非颗粒状笔石(綦江观音桥露头);q.颗粒状笔石(AA, 1 099 m);r.层状藻类体,呈现橙色荧光(AA, 1 099 m);s.非颗粒状笔石(AA, 1 099 m);t.笔石呈现深褐色荧光(城口庙坝露头)

1.21%~4.91%之间。笔石随机反射率与固体沥青(Type A)随机反射率呈现出良好的关系(图3; $R^2=0.9285$)。固体沥青(Type A)反射率略低于笔石反射率,随着成熟度的增高,笔石随机反射率的增速大于固体沥青,各个显微组分的各向异性也随着成熟度增加而显著增强。Yang and Hesse(1993)对加拿大南部阿巴拉契亚逆冲带成岩和变质作用的研究,也表明焦沥青随机反射率低于笔石随机反射率

(图4)。通过对比加拿大奥陶统笔石与沥青的随机反射率关系(Bertrand *et al.*, 2003; Bertrand and Mallo, 2012),不难发现当笔石反射率小于4%时,二者呈现良好的正相关性;但当笔石随机反射率大于4%,表现出笔石反射率增速远高于沥青反射率。这两类显微组分反射率均可以表征下古生界页岩有机质成熟度。但是从数据离散度来看,在垂直层面切片方向上,相对于固体沥青,笔石随机反射率分布更为

表 1 研究区随机反射率与等效镜质体反射率(岩心样品)

Table 1 Random reflectance and equivalent vitrinite reflectance for grapholite and solid bitumen (core samples)

样品	地点	层位	岩性	深度 (m)	TOC (%)	GR _o (%)	标准差	测点 (%: Type A)	BR _o 测点 (%: Type B)	BR _o		标准差	测点 EqVR _o -1	EqVR _o -2	EqVR _o -3	EqVR _o -4	EqVR _o -5		
										BR _o	BR _o								
AA	城口	S ₁ l	页岩	1 099	1.28	1.41	0.08	17	1.36	0.09	8	—	—	1.19	1.35	1.39	1.19		
BB	酉阳	S ₁ l	页岩	1 247.1	0.97	2.73	0.10	41	2.59	0.21	6	—	—	2.59	2.70	2.65	—		
CC-1		S ₁ l	页岩	3 711.9	4.19	2.88	0.15	43	2.64	0.17	22	—	—	2.73	2.76	2.71	—		
CC-2		S ₁ l	页岩	3 722.18	6.33	2.86	0.10	34	2.53	0.08	29	—	—	2.71	2.64	2.57	—		
DD-1	威远	S ₁ l	页岩	3 575.44	2.44	2.97	0.18	23	2.68	0.20	19	—	—	2.81	2.80	2.77	—		
DD-2		S ₁ l	页岩	3 582.52	3.67	3.01	0.09	26	2.65	0.09	6	—	—	2.85	2.77	2.73	—		
DD-3		S ₁ l	页岩	3 584.4	3.97	2.97	0.15	18	2.38	0.08	16	—	—	2.81	2.48	2.39	—		
EE-1	长宁	S ₁ l	页岩	1 269.33	1.21	3.11	0.19	11	2.82	0.06	5	—	—	2.94	2.95	2.95	—		
EE-2		S ₁ l	页岩	—	2.63	3.19	0.10	13	—	—	—	—	—	3.02	—	—	—		
FF-1	永川	S ₁ l	页岩	3 813.6	1.87	3.18	0.15	23	2.71	0.1	22	—	—	3.01	2.83	2.80	—		
FF-2		S ₁ l	页岩	3 860	4.00	3.20	0.13	42	2.78	0.12	18	2.05	0.25	9	—	3.03	2.91		
GG	黔江	S ₁ l	页岩	7 41.3	1.17	3.20	0.12	30	2.59	0.21	6	—	—	3.03	2.70	2.65	—		
HH	彭水	S ₁ l	页岩	2 153.29	2.82	3.38	0.09	10	2.68	0.13	7	2.43	0.04	12	—	3.20	2.80	2.77	
JJ-1	丁山	S ₁ l	页岩	3 787.2	2.04	3.26	0.10	27	2.9	0.18	10	2.22	0.23	3	—	3.08	3.04	3.05	
JJ-2		O ₃ w	页岩	3 817.3	3.56	3.40	0.10	27	2.75	0.11	5	—	—	—	3.22	2.88	2.86	—	
KK-1		S ₁ l	页岩	2 825.2	4.67	3.80	0.15	18	3.58	0.14	6	2.72	0.05	3	—	3.59	3.76	3.96	
KK-2	武隆	S ₁ l	页岩	2 829.3	5.37	3.62	0.16	27	—	—	—	2.62	0.16	24	—	3.42	—	—	
LL		S ₁ l	页岩	750	4.03	4.07	0.15	31	3.59	0.12	6	2.81	0.55	16	—	3.84	3.77	3.98	
MM-1		S ₁ l	页岩	2 516	1.73	3.78	0.29	8	3.28	0.35	36	2.37	0.31	7	—	3.57	3.44	3.55	
MM-2	涪陵	S ₁ l	页岩	2 535.31	4.23	3.72	0.24	22	3.3	0.21	11	2.44	0.33	14	—	3.52	3.46	3.58	
NN		S ₁ l	页岩	2 609.35	4.00	3.85	0.16	25	3.02	0.13	9	2.55	0.15	31	—	3.64	3.16	3.21	
PP-1	咸丰	S ₁ l	页岩	530.42	1.86	3.71	0.21	62	3.53	0.16	7	2.54	0.3	8	—	3.51	3.71	3.53	
PP-2		S ₁ l	页岩	552.4	0.92	3.61	0.19	8	3.55	0.72	4	—	—	—	—	3.41	3.73	3.92	
QQ	仁怀	S ₁ l	页岩	4047	4.17	4.15	0.12	21	3.53	0.32	23	—	—	—	—	3.92	3.71	3.89	
RR-4		S ₁ l	页岩	4 484.2	1.98	—	—	31	0.24	30	—	—	—	—	—	—	3.26	3.33	3.11
RR-5		S ₁ l	页岩	4 491.45	2.12	4.36	0.21	10	3.31	0.28	8	—	—	—	—	4.12	3.47	3.60	3.31
RR-1	石柱	S ₁ l	页岩	4 503.15	5.48	4.32	0.15	19	3.75	0.45	14	2.85	0.18	7	—	4.08	3.94	4.20	3.75
RR-2		S ₁ l	页岩	4 505.47	5.79	4.49	0.10	37	—	—	—	—	—	—	—	4.24	—	—	—
RR-3		O ₃ w	页岩	4 515.15	5.01	4.23	0.11	21	—	—	—	2.84	0.21	20	—	3.99	—	—	—
SS	利川	S ₁ l	页岩	2 811.4	2.89	4.73	0.31	13	3.89	0.53	9	2.78	0.28	4	—	4.46	4.09	4.40	3.89
TT-1		S ₁ l	页岩	3 055	3.80	4.91	0.13	5	3.95	0.32	4	—	—	—	—	4.63	4.16	4.48	3.95
TT-2		S ₁ l	页岩	3 083	6.50	4.89	0.13	19	—	—	—	—	—	—	—	4.61	—	—	—

注: EqVR_o-1 的等效公式 EqVR_o=0.73GR_o+0.16(Petersen *et al.*, 2013); EqVR_o-2 的等效公式 EqVR_o=0.936(Bertrand and Malo, 2001, 2012); EqVR_o-3 的等效公式 EqVR_o=0.811 3BR_o^{1.243.8}(Bertrand and Malo, 2012); EqVR_o-4 的等效公式 EqVR_o=0.936(Bertrand and Malo, 2001); EqVR_o-5 的等效公式 EqVR_o=0.936(Bertrand and Malo, 2001, 2012); EqVR_o>3.0%, VR_o≈BR_o。

表2 笔石和固体沥青随机反射率与等效镜质体反射率(露头样品)
Table 2 Random reflectance and equivalent vitrinite reflectance for graptolite and solid bitumen (outcrop samples)

样品	露头	地层	岩性	TOC (%)	GR _o (%)	BR _o (%; Type A)	BR _o (%; Type B)	测点		标准差	测点	BR _o (%; Type A)	BR _o (%; Type B)	测点	BR _o (%; Type A)	BR _o (%; Type B)	测点	BR _o (%; Type A)	BR _o (%; Type B)	
								测点	BR _o											
CKMB	S ₁ l	页岩	1.45	1.21	0.05	35	1.16	0.08	6	0.78	0.07	14	1.04	1.16	1.18	0.98				
CKMB-Y2	城口庙坝	S ₁ l	页岩	2.13	1.28	0.07	29	1.23	0.09	1.2	—	—	—	1.09	1.23	1.25	1.05			
CKMB-Y1	S ₁ l	页岩	3.61	1.32	0.08	18	1.21	0.07	9	—	—	—	1.12	1.27	1.23	1.03				
CKHP	城口厚坪	S ₁ l	页岩	4.24	2.19	0.12	13	2.01	0.20	29	—	—	—	—	2.08	2.08	1.93			
DZBY	道真巴渝	S ₁ l	页岩	3.38	2.49	0.10	37	2.14	0.11	23	—	—	—	—	2.36	2.22	2.09			
CKMT	城口明通	S ₁ l	页岩	2.37	2.54	0.09	30	2.25	0.16	22	—	—	—	—	2.41	2.34	2.22			
WXBL	巫溪白鹿	S ₁ l	页岩	5.73	2.55	0.12	16	2.32	0.17	13	—	—	—	—	2.42	2.42	2.31			
XYSQ-1	叙永双桥	S ₁ l	页岩	2.89	2.61	0.14	5	2.52	0.23	18	1.88	0.17	3	—	2.47	2.63	2.56			
XYSQ-2	S ₁ l	页岩	3.14	2.59	0.07	27	2.47	0.13	13	—	—	—	—	—	2.46	2.58	2.50			
XSTH	习水土河	O _{3w}	页岩	9.02	2.60	0.07	33	2.66	0.02	2	—	—	—	—	2.47	2.78	2.74			
XSQLC	习水骑龙村	S ₁ l	页岩	3.14	2.79	0.11	13	2.64	0.22	18	—	—	—	—	2.64	2.76	2.71			
WSSLZ	万盛石林镇	S ₁ l	页岩	4.65	2.83	0.07	34	2.85	0.32	10	—	—	—	—	2.68	2.98	2.98			
QJGYQ	綦江观音桥	S ₁ l	页岩	3.88	2.83	0.11	28	2.63	0.15	6	1.93	0.25	3	—	2.68	2.75	2.70			
YYMB	酉阳毛坝	S ₁ l	页岩	6.45	3.00	0.13	33	2.74	0.15	16	—	—	—	—	2.84	2.86	2.84			
WLJK	武隆江口	S ₁ l	页岩	4.22	3.02	0.09	32	2.75	0.11	28	—	—	—	—	2.86	2.88	2.86			
NCSQ	南川三泉	S ₁ l	页岩	0.80	3.09	0.22	7	3.01	0	1	—	—	—	—	2.92	3.15	3.19	3.01		
XXDHB-1	西乡大河坝	S ₁ l	页岩	2.95	3.18	0.17	19	2.78	0.59	7	—	—	—	—	3.01	2.91	2.89			
XXDHB-2	S ₁ l	页岩	2.64	3.12	0.20	18	2.90	0.34	23	—	—	—	—	—	2.95	3.04	3.05			
TJNSH	通江诺水河	S ₁ l	页岩	4.50	3.38	0.14	22	3.21	0.14	5	2.11	0.03	2	—	3.20	3.37	3.46	3.21		
WLHY	武隆黄莺	O _{3w}	页岩	3.79	3.40	0.08	23	2.7	0.49	23	—	—	—	—	3.22	2.82	2.79			
CNSH	长宁双河	S ₁ l	页岩	3.30	3.64	0.10	21	3.23	0.54	15	—	—	—	—	3.44	3.39	3.49			
SZQL	石柱漆辽	S ₁ l	页岩	5.57	3.65	0.10	37	3.06	0.15	9	2.47	0.19	18	—	3.45	3.21	3.26	3.06		

注:EqVR_o-1、EqVR_o-2、EqVR_o-3、EqVR_o-4 和 EqVR_o-5 的注释同表1。

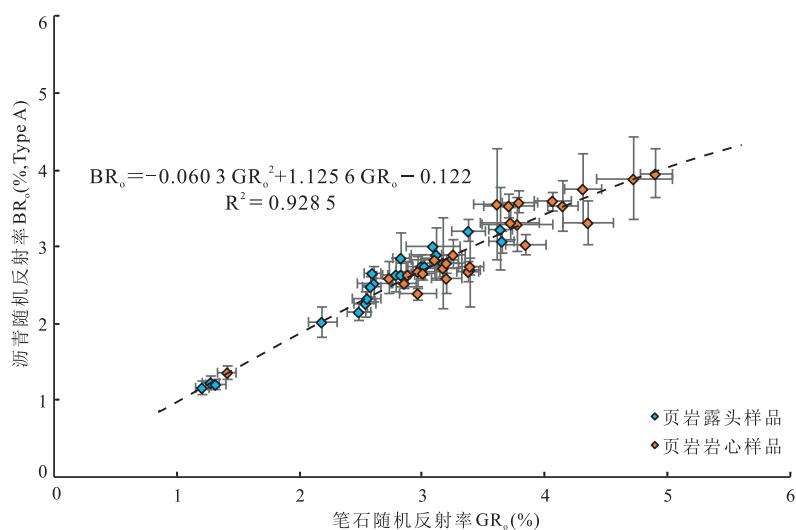


图 3 五峰—龙马溪组页岩笔石随机反射率与固体沥青反射率(Type A)的关系

Fig.3 Relationship between graptolite random reflectance and solid bitumen (Type A) for Wufeng-Longmaxi shale

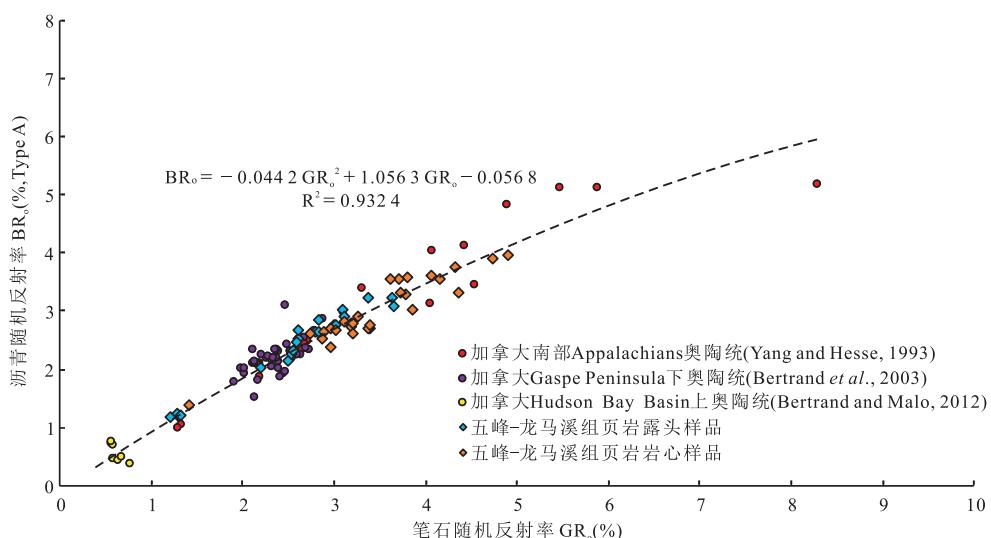


图 4 笔石随机反射率与固体沥青随机反射率的关系

Fig.4 Relationship between graptolite random reflectance and solid bitumen random reflectance

集中,更适合作为有机质成熟度指标(图 5)。

3.3 等效镜质体反射率换算公式对比

3.3.1 固体沥青 针对四川盆地五峰—龙马溪组页岩的成熟度研究,先前多是采用沥青反射率转换为等效镜质体反射率的方法(聂海宽等,2012; Li *et al.*, 2016),虽然已有诸多学者根据不同地区的样品建立了沥青与等效镜质体之间的关系(图 6,表 3),但在四川盆地中基本都是应用丰国秀和陈盛吉(1988)以及 Jacob(1989)提出的公式,结果表明页岩成熟度整体处于过成熟阶段。但是当固体沥青反射率超过 1.5%~2.0% 后,沥青表现出很强的各向异性和非均质性(Xiao *et al.*, 2000),特别是固体沥

青少、颗粒小,测得的固体沥青反射率变化大。此外,沥青在不同的岩性中存在着不同的赋存模式,由于沥青表面质量不均一性和纳米孔隙的存在(Loucks *et al.*, 2009; Bernard *et al.*, 2012),沥青显微尺度上的差异也造成了反射率测量的差异,进而难以获得准确的反射率(Sanei *et al.*, 2015)。这些因素都导致了不同研究者对同一地区的页岩成熟度研究的结果差异较大(聂海宽等,2012; Dai *et al.*, 2014; Zou *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2016; 刘树根等,2016)。

Bertrand and Héroux (1987)研究加拿大魁北克 Anticosti 岛奥陶系—志留系有机质组分反射率

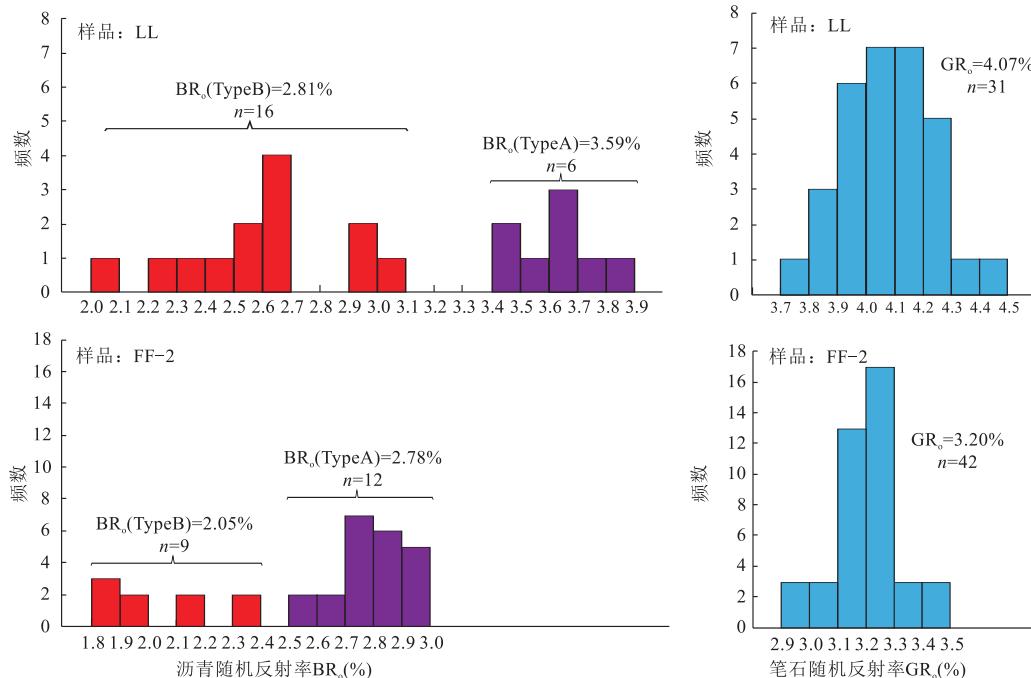


图 5 五峰—龙马溪组页岩有机显微组反射率分布直方图

Fig.5 Histograms of reflectance distribution of organic macerals for Wufeng-Longmaxi shale

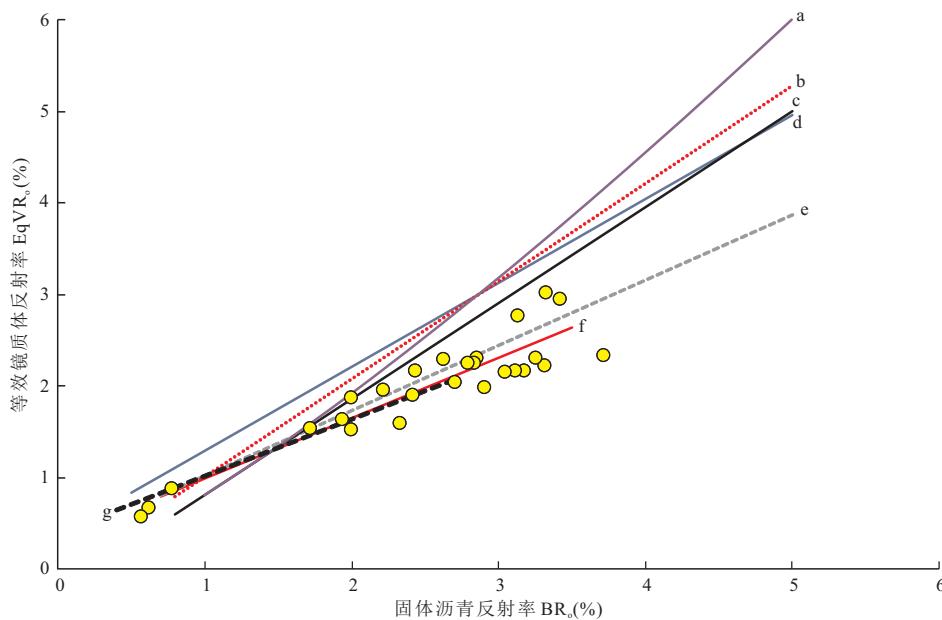


图 6 基于页岩固体沥青反射率转换等效镜质体反射率的公式对比

Fig.6 Comparison of formulas for equivalent vitrinite reflectance (solid bitumen)

a. 加拿大 Hudson Bay 盆地古生界, 据 Bertrand and Malo(2012); b. 加拿大 Gaspe Belt 盆地志留系—泥盆系烃源岩, 据 Bertrand and Malo(2001); c. Schoenherr *et al.*(2007) 综合 Jacob(1989) 和 Landis and Castaño(1995) 数据拟合; d. 据 Landis and Castaño(1995); e. 热模拟样品(抚顺第三系和乌鲁木齐二叠系), 据丰国秀和陈盛吉(1988); f. 四川盆地二叠系—三叠系自然演化样品, 据丰国秀和陈盛吉(1988); g. 据 Jacob(1989). 黄色圆点为四川盆地二叠系和三叠系 VR₀ 与 BR₀ 实测值, 据丰国秀和陈盛吉(1988)

表 3 基于固体沥青反射率的等效镜质体反射率换算公式

Table 3 Equivalent vitrinite reflectance conversion formulas (solid bitumen)

转换关系式	研究地区	适用条件	来源
$\text{EqVR}_o = 0.6569 \text{BR}_o + 0.3364$ (自然样品)	四川盆地含有镜质体和沥青组分的二叠系和三叠系		
$\text{EqVR}_o = 0.7119 \text{BR}_o + 0.3088$ (热模拟)	油页岩热模拟(乌鲁木齐二叠系和抚顺第三系)	$\text{BR}_o < 5.0\%$	丰国秀和陈盛吉 (1988)
$\text{EqVR}_o = 0.679 \text{BR}_o + 0.3195$ (校正后)	自然演化和热模拟样品结果拟合		
$\text{EqVR}_o = 0.618 \text{BR}_o + 0.4$	根据世界各地 30 个同时含有沥青和镜质体的样品中“低反射”沥青反射率数据	$\text{VR}_o < 2.5\%$	Jacob (1989)
$\text{EqVR}_o = (\text{BR}_o + 0.41) / 1.09$	加拿大西部和美国南部油砂露头样品	$\text{VR}_o < 5.0\%$	Landis and Castaño (1995)
$\text{EqVR}_o = 0.668 \text{BR}_o + 0.346$	根据 BR_o 与 VR_o 的对比实验结果, 引用地质剖面储层固体沥青反射率与镜质体反射率的实测结果获得	$\text{VR}_o < 4.0\%$ 碳酸盐岩	刘德汉和 史继扬(1994)
$\text{EqVR}_o = (\text{BR}_o + 0.2443) / 1.0495$	综合 Jacob(1989) 和 Landis and Castaño (1995) 数据获得 South Oman Salt Basin 下寒武统碳酸盐岩储层固体沥青应用	$\text{VR}_o < 5.0\%$	Schoenherr <i>et al.</i> (2007)
$\text{EqVR}_o = (\text{BR}_o + 0.03) / 0.96$	加拿大 Gaspe Peninsula 东北部古生界海相灰岩地层	灰岩	Bertrand(1990)
$\text{EqVR}_o = (\text{BR}_o - 0.13) / 0.87$	加拿大 Gaspe Peninsula, Mingan Archipelago-Anticosti Island, Central St.Lawrence Lowlands, Mackenzie Area 古生界	灰岩	Bertrand(1993)
类似于 Jacob (1989)		$\text{BR}_o \leq 0.52\%$	
$\text{EqVR}_o = 0.277 \text{BR}_o + 0.57$	西加盆地下侏罗统“Nordegg Member”泥灰岩—钙质泥岩沥青反射率与从白垩系地层成熟度梯度外推的镜质体反射率获得	$\text{BR}_o > 0.52\%$ I / II 含硫烃源岩	Riediger (1993)
$\text{BR}_{o_{\max}} = -0.519 + 1.341 \text{VR}_{o_{\max}} - 0.0977 (\text{VR}_{o_{\max}})^2 + 0.0151 (\text{VR}_{o_{\max}})^3$	瑞士 Alps 二叠系—三叠系	$0.2 < \text{BR}_{o_{\max}} < 8.0$ 沥青最大反射率	Ferreiro Mählmann and Frey(2012)
$\text{EqVR}_o = (\text{BR}_o - 0.059) / 0.936$	加拿大 Gaspe Peninsula 泥盆系共存均质镜质体与几丁虫以几丁虫反射率为中间变量获得二者关系	$\text{VR}_o > 1.5\%$ 焦沥青	Bertrand and Malo (2001)
$\text{EqVR}_o = 0.8113 \text{BR}_o^{1.2438}$	根据加拿大 Hudson Bay 盆地上古生界海相地层同时含有镜质体和沥青的样品结合 Bertrand(1990, 1993)、 Bertrand <i>et al.</i> (2003) 和 Bertrand and Malo (2001) 数据获得	页岩/泥灰岩 灰岩运移沥青	Bertrand and Malo(2012)

时,发现沥青反射率与镜质体反射率在成熟度为 1.0%~1.1% 时,二者近似相等.但当 $\text{BR}_o > 1.1\%$ 时,二者的关系不同于丰国秀和陈盛吉(1988)与 Jacob(1989)提出的公式.Bertrand(1990)根据加拿大东部 Gaspe 地区泥盆系中几丁虫和结构镜质体共存的事实,建立了几丁虫反射率与结构镜质体反射率的对应关系,并由此获得固体沥青与结构镜质体的对应关系,然而固体沥青与镜质体反射率的关系可能会因岩性的差异而不同.Bertrand(1993)对这个问题进行了深入的研究,并获取了赋存于不同岩性的焦沥青与等效镜质体反射率的关系,将加拿大 4 个地区古生界中的固体沥青分为呈连续无定形体的低反射率原沥青和高反射率不规则状的运移沥青.被称为运移沥青并不意味其为异地来源,此沥青也被定义为焦沥青.Bertrand and Malo (2001, 2012)推导出加拿大 Gaspe Belt 盆地和 Hudson Bay 盆地古生界页岩 EqVR_o 与 BR_o 的关系,总体来说差异不大.Grobe *et al.* (2016) 研究了阿曼 Jebel

Akhdar 碳酸盐岩台地逆冲推覆带地层成熟度,等效镜质体反射率换算使用 Jacob (1989) 的公式 ($\text{BR}_o < 1.5\%$),当 $\text{BR}_o = 1.5\% \sim 3.0\%$ 时使用 Landis and Castaño (1995) 的公式.当 $\text{BR}_o > 3.0\%$, $\text{BR}_o \approx \text{VR}_o$.刘文斌等(2008)研究了川东北地区普光 5 井飞仙关—长兴组沥青反射率,也认为当 $\text{BR}_o > 3.0\%$ 时 BR_o 与 VR_o 接近.如图 6 所示,笔者将可以作为页岩等效镜质体反射率的转换公式进行了对比,并将四川盆地二叠系和三叠系共存的镜质体和沥青反射率实测数据(丰国秀和陈吉盛,1988)进行投点,发现当 $\text{BR}_o > 2.5\%$ 时出现了两个明显的趋势.Jacob(1989)回归公式中包含的沥青反射率最大值为 2.7%.综上所述,丰国秀和陈吉盛(1988)以及 Jacob(1989)提出的公式并不适合成熟度极高的五峰—龙门溪组页岩等效镜质体反射率的换算.

3.3.2 笔石 许多学者对笔石反射率与镜质体反射率的等效经验关系开展了研究(图 7, 图 8, 表 4),其转换关系需要通过中间变量进行换算.Gentzis

et al.(1996)以牙形石色变指数 CAI 作为中间变量获得了二者间的半定量关系(图 7);祝幼华等(1998)选取下扬子江苏地区奥陶系和志留系的笔石进行反射率测试,同样以牙形石色变指数 CAI 为中间量获得了等效镜质体反射率与笔石最大反射率的转换公式。然而 CAI 作为颜色变化的定性参数,没有统一的色标,受人为因素影响大,因此只能作为半定量的指标。Bertrand(1990)在加拿大东部 Gaspe Peninsula 泥盆系中发现了几丁虫和结构镜质体共存的事实,并获得了几丁虫反射率与结构镜质体反射率的相关关系,由此得到虫牙、笔石反射率与结构镜质体的对应关系。但是 Gaspe Peninsula 泥盆系中结构镜质体反射率值最大为 3.0%。Petersen *et al.*(2013)将热解 T_{max} 作为中间变量,建立了斯堪的维亚纳地区南部下古生界 Alum 页岩笔石随机反射率与等效镜质体反射率的对比关系,但他们认为镜状体来源于笔石碎屑,所以其公式中的笔石反射率包含了镜状体反射率。但由于 T_{max} 在高熟阶段 S_2 值很低(Hackley and Cardott, 2016),所以该公式在高演化阶段使用受限。Colțoi *et al.*(2016)在研究罗马尼亚 Moesian Platform 志留系页岩成熟度和烃源岩潜力时,根据同层位 Tasmanites 藻荧光特征、镜质体和笔石之间的关系推导出的等效公式,与 Petersen *et al.*(2013)提出的公式类似。曹长群(2000)通过对我国塔里木盆地、鄂尔多斯盆地、江苏等地区

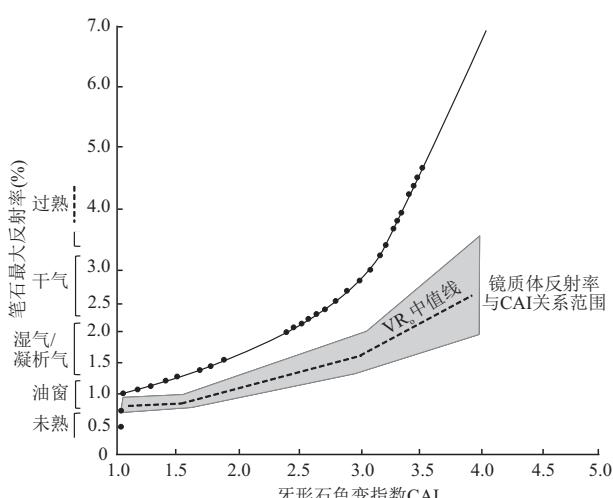


图 7 牙形石色变指数与笔石最大反射率和镜质体反射率的半定量关系

Fig.7 Semi-quantitative relationship among conodont alteration index, graptolite maximum reflectance and vitrinite reflectance

Gentzis *et al.*(1996)

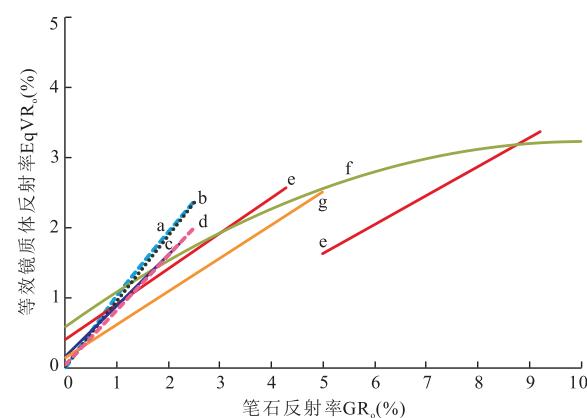


图 8 基于笔石反射率转换等效镜质体反射率的公式对比
Fig.8 Formulas of equivalent vitrinite reflectance based on graptolite

a.据 Bertrand(1990); b.据 Bertrand (1993) 和 Bertrand and Malo (2001, 2012); c. 据 Petersen *et al.* (2013); d. 据 Colțoi *et al.* (2016); e. $GR_{o\ max}$, 据曹长群等(2000); f. 据曹长群等(2000); g. $GR_{o\ max}$, 据祝幼华等(1998)

奥陶系和志留系笔石反射率的研究,以有机地球化学等综合分析指标为中介,建立起笔石随机反射率和最大反射率与等效镜质体反射率之间的对应关系。但是由于五峰—龙门溪组页岩普遍处于过成熟阶段,其笔石随机反射率普遍大于 2.5%,使得荧光光度术、 T_{max} 和生物标志化合物传统的有机地球化学手段失效,因此这些公式不适用于成熟度极高的五峰—龙门溪组页岩的评价。综上,笔石反射率与等效镜质体反射率的换算关系还需进一步研究。

3.3.3 镜状体 Buchardt and Lewan(1990)在研究斯堪的纳维亚南部中寒武统下奥陶统 Alum 页岩时记录了一种类似于镜质体的有机显微组分——镜状体或类镜质体,并详细描述了其光性特征,在透射光下为褐色、反射光下为灰色—灰白色,形态呈碎屑状,轮廓清楚,孤立存在。他们认为镜状体是藻类、菌丝,也可能是由节肢动物经凝胶化作用形成,常表现出多种变化形态,是一种原生的显微有机组分。Xiao *et al.* (2000)描述了塔里木盆地下古生界镜状体的特点,其平行于层理面,典型长条不规则透镜状,均质结构,表面光滑,各向异性弱,甚至在高成熟度时也没有内部结构,在低成熟度的情况下发深褐色荧光。前人在不同地区研究热模拟系列和自然演化系列样品时建立了镜状体反射率与镜质体反射率的换算公式(表 4)。

尽管前人认为可以利用镜状体反射率标定下古生界烃源岩的成熟度(Xiao *et al.*, 2000;

表 4 基于笔石和镜状体的等效镜质体反射率换算公式

Table 4 Equivalent vitrinite reflectance conversion formulas (graptolite and vitrinite-like maceral)

换算公式		研究地区	适用条件	来源
$\lg GR_o = 1.1 \lg EqVR_o - 0.04$		加拿大东部 Gaspe 地区池盆系	$GR_o < 3\%$	Bertrand (1990)
$EqVR_o = 0.9376 GR_o + 0.0278$ 或 $EqVR_o = 0.9686 GR_o^{0.9319}$		加拿大 GaspeBelt 盆地和 HudsonBay 盆地古生界页岩	$GR_o < 3\%$	Bertrand and Malo (2001, 2012)
$EqVR_o = (GR_{o_{max}} + 0.3221) / 2.113$		下扬子江苏地区钻井奥陶系—志留系 牙形石色变指数作为中间变量	$GR_{o_{max}} < 5.0\%$	祝幼华等(1998)
笔石	$EqVR_o = -0.026 GR_o^2 + 0.524 GR_o + 0.5925$ $EqVR_o = 0.5089 GR_{o_{max}} + 0.4064$ $EqVR_o = 0.4168 GR_{o_{max}} - 0.4655$	塔里木盆地、鄂尔多斯盆地、江苏等地区奥陶系—志留系 有机地球化学等综合分析指标为中介	笔石随机反射率 $0.72\% < GR_{o_{max}} < 4.27\%$ $5\% < GR_{o_{max}} < 9.21\%$	曹长群等(2000)
	$EqVR_o = 0.73 GR_o + 0.16$	北欧斯堪的纳维亚中寒武系一下志留统 以 T_{max} 作为中间变量	$GR_o < 2.2\%$	Petersen <i>et al.</i> (2013)
	$EqVR_o = 0.785 GR_o + 0.05$	罗马尼亚 Moesian Platform 志留系 同层位 Tasmanites 荧光	$GR_o < 2.5\%$	Coltoiu <i>et al.</i> (2016)
镜状体	$EqVR_o = 0.461 VLMR_o + 0.75$ $EqVR_o = 1.26 VLMR_o + 0.21$ $EqVR_o = 0.28 VLMR_o + 1.03$ $EqVR_o = 0.81 VLMR_o + 0.18$	爱沙尼亚奥陶系 Kukersite 油页岩和相近成熟度褐煤热模拟 塔里木盆地寒武系和奥陶系海相烃源岩自然演化序列 石炭系低成熟度海相烃源岩热模拟	$0.73\% < VR_o < 2.0\%$ $VLMR_o < 0.75\%$ $0.75\% < VLMR_o < 1.5\%$ $VLMR_o > 1.5\%$	程顶胜等(1995) 刘祖发等(1999) Xiao <i>et al.</i> , (2000)
	$EqVR_o = 0.533 VLMR_o + 0.667$ $EqVR_o = 0.917 VLMR_o + 0.1819$ $EqVR_o = 0.8452 VLMR_o + 0.3756$	爱沙尼亚奥陶系 Kukersite 油页岩和黄县褐煤热模拟残渣 南美 Paraná 盆地古生界 Ponta Grossa 组 泥盆系钻孔和下泥盆系露头样品	$1.0\% < VR_o < 2.0\%$ $VLMR_o \leq 0.75\%$ $0.75\% < VLMR_o \leq 1.50\%$	王飞宇等(1996) Schmidt <i>et al.</i> (2015)

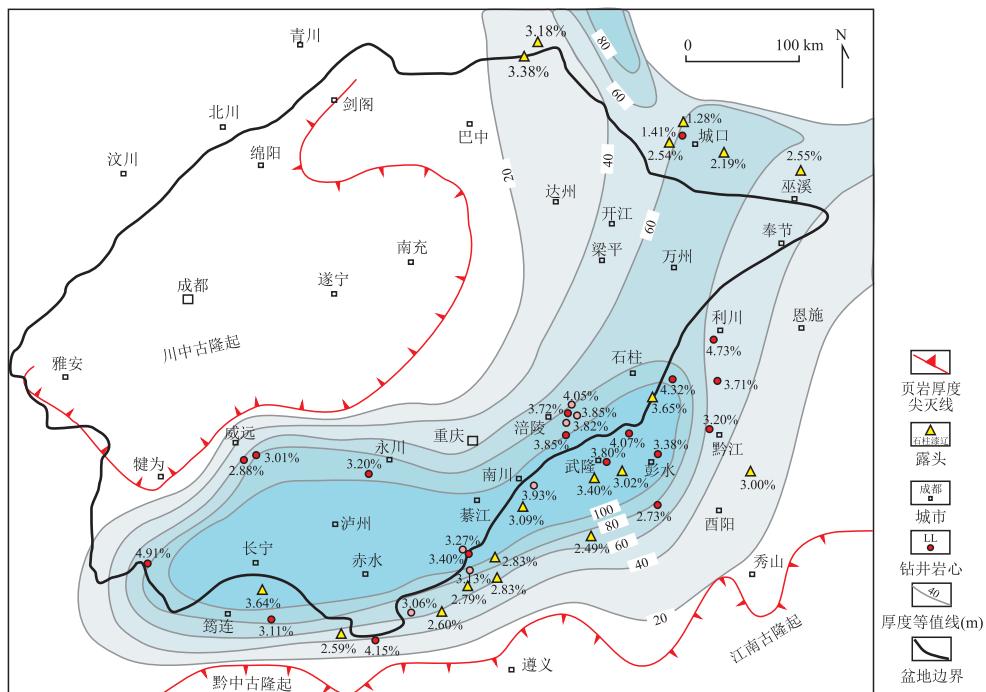


图9 四川盆地五峰—龙马溪组页岩笔石随机反射率分布

Fig.9 Graptolite random reflectance of the Wufeng-Longmaxi shale in Sichuan Basin
红色圆点和黄色三角形分别为此次研究岩心样品和露头样品实测数据,粉色圆点据仰云峰(2016)

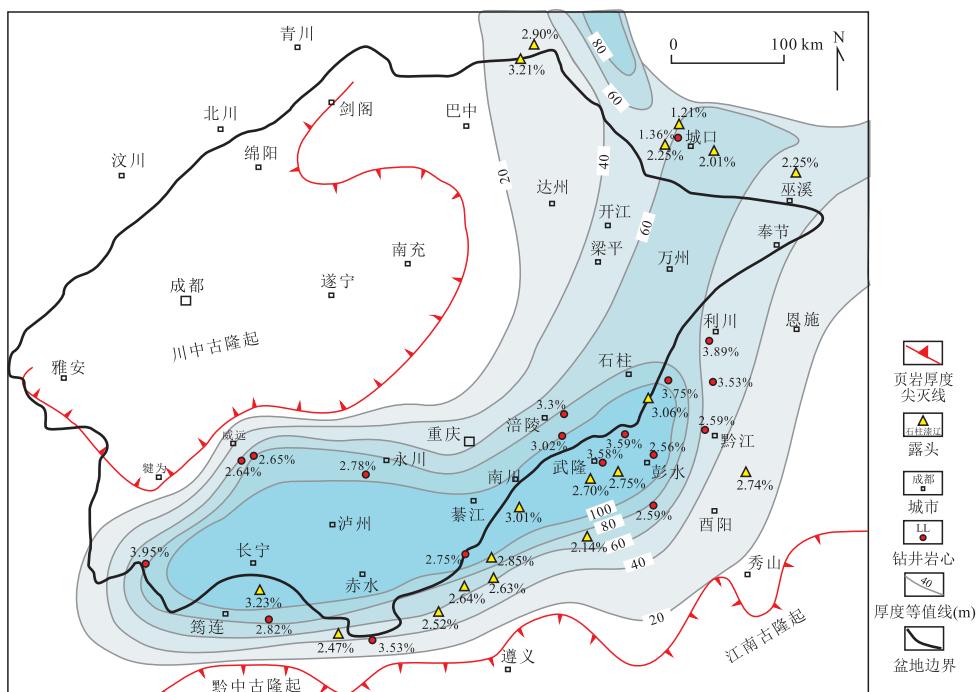


图10 四川盆地五峰—龙马溪组页岩固体沥青(Type A)随机反射率分布

Fig.10 Solid bitumen (Type A) random reflectance of the Wufeng-Longmaxi shale in Sichuan Basin

Schmidt *et al.*, 2015),但对于镜状体的成因目前还有很大争议,主要观点分为3类:(1)生物凝胶化作

用形成,来源于藻类多糖(多细胞藻)、真菌菌丝和节肢动物的角质层(Buchardt and Lewan, 1990);(2)

藻类降解原地残留产物(王飞宇等,1996);(3)来源于笔石碎片,Belaid *et al.*(2010)研究利比亚 Murzuq 盆地下志留统 Hot shale 成熟度和热史时,将镜状体描述为轮廓清晰,表面光滑,呈棱角状、细长条状和颗粒状分散在岩石基质中,但其照片看起来与笔石十分相似,Petersen *et al.*(2013)认为 Alum 页岩中镜状体组分也是由笔石碎片组成,随着埋藏深度和温度的增加,镜状体与笔石有相同的热成熟过程.五峰—龙马溪组页岩非颗粒状笔石(图 2p)与上述镜状体的特征十分类似.Riediger *et al.* (1989)认为颗粒状笔石碎片可能由笔石软体部分(公共管道)形成,但是目前对于颗粒状笔石与非颗粒状笔石的关系尚未有明确的认识.基于上述分析,笔者推测五峰—龙马溪组海相页岩中的镜状体可能大多数是透镜状的非颗粒状笔石.

3.4 等效镜质体反射率与成熟度平面分布特征

理论上,笔石反射率和沥青反射率转换的等效镜质体反射率值应该是一致或近似的.根据上述分析分别选取 Petersen *et al.* (2013) 和 Bertrand and Malo (2001,2012) 提出的等效镜质体反射率公式进行换算(表 1,表 2),可以看出通过笔石和沥青换算的二者等效镜质体反射率较为接近,但是当 GR_r 超过 4.0% 时,基于笔石反射率换算的等效镜质体反射率明显要高于通过沥青反射率换算的等效镜质体反射率(表 1).这说明可能在笔石随机反射率 4.0% 左右时存在阶跃.当笔石随机反射率 GR_r>4.0%、等效镜质体反射率 EqVR_r>3.5%,石墨化作用开始发生.Malinconio (1993) 在研究笔石与镜质体反射率各向异性光性变化时,亦发现笔石最大反射率与镜质体最大反射率的热演化过程在 4%~6% 时开始出现差异.统计得到的笔石随机反射率与固体沥青随机反射率的关系也表现出这样的趋势(图 6).仰云峰(2016)和 Luo *et al.* (2016,2017) 分别对五峰—龙马溪组页岩笔石随机反射率和最大反射率进行研究,由于针对高—过成熟阶段基于笔石反射率换算等效镜质体公式缺乏统一认识,所以他们获得的等效镜质体反射率值差异大.因此,对笔石反射率与等效镜质体反射率在过成熟阶段的换算关系需要进一步研究.

从区域分布上看,五峰—龙马溪组页岩已处于过成熟阶段,总体而言盆地周缘成熟度低于盆地内成熟度,其中盆地西南部和东北部存在两个异常高值区(图 9,图 10).由于受峨眉山玄武岩热效应的影响(Jiang *et al.*, 2018; Zhu *et al.*, 2018),川西南地

区整体地温梯度高,TT 井等效镜质体反射率表明其已进入浅变质阶段的门限.而川东南地区五峰—龙马溪组页岩受峨眉山玄武岩热效应的影响并不明显,烃源岩的成熟过程和最终演化程度主要受沉积埋藏作用控制(朱传庆等,2013),热演化程度总体低于川西南和川东地区.川东石柱—利川一带的异常特征与沉积后期的快速深埋藏有关.川东北城口地区整体成熟度明显偏低,城口庙坝地区在油窗范围内,AA 井等效镜质体反射率为 1.18% 左右,与样品中观察到橙色荧光的层状藻类体相吻合.

4 结论

准确区分笔石和固体沥青是确定五峰—龙马溪组页岩有机质成熟度的前提.如果把固体沥青作为成熟度指标,应当细致鉴别固体沥青类型.依据其显微结构形态和光性特征,五峰—龙马溪组页岩固体沥青大体上可分为两类:一类是颗粒状—棱角状的高反射率焦沥青;另一类是以细小的有机质颗粒大量分散于粘土矿物基质中的低反射率基质固体沥青.其中焦沥青反射率可以表征下古生界页岩有机质成熟度.运用固体沥青反射率,必须注意区分沥青的成因类型和聚集模式,同时结合区域构造热演化历史的分析也必不可少.

在垂直层面切片方向,焦沥青反射率略低于笔石反射率,且随着成熟度的增高,笔石反射率的增速大于焦沥青,各向异性也显著增强.相对于固体沥青反射率,笔石随机反射率分布更为集中,更适合作为含笔石页岩有机质成熟度指标,笔石反射率与等效镜质体反射率在过成熟阶段的换算关系还需进一步研究.基于四川盆地大量钻井岩心和露头样品笔石随机反射率的数据,四川盆地五峰—龙马溪组页岩整体处于过成熟阶段,而盆地东北部城口地区成熟度在油窗范围内.

致谢:由衷感谢中国地质调查局油气资源调查中心尹成明教授,中科院重庆研究院谭彦虎博士,重庆地质矿产研究院页岩气分院张烨院长,检测中心栾进华主任、胡科工程师和杨柳工程师对野外样品采集工作提供的大力帮助!感谢张同伟教授、李艳芳博士、李新景博士提供部分露头样品!感谢审稿人对文章的指导与建议!

References

Belaid, A., Krooss, B. M., Littke, R., 2010. Thermal History

- and Source Rock Characterization of a Paleozoic Section in the Awbari Trough, Murzuq Basin, SW Libya. *Marine and Petroleum Geology*, 27(3): 612—632. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.06.006>
- Bernard, S., Wirth, R., Schreiber, A., et al., 2012. Formation of Nanoporous Pyrobitumen Residues during Maturation of the Barnett Shale (Fort Worth Basin). *International Journal of Coal Geology*, 103: 3—11. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2012.04.010>
- Bertrand, R., 1990. Correlations among the Reflectances of Vitrinite, Chitinozoans, Graptolites and Scolecodonts. *Organic Geochemistry*, 15(6): 565—574. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(90\)90102-6](https://doi.org/10.1016/0146-6380(90)90102-6)
- Bertrand, R., 1993. Standardization of Solid Bitumen Reflectance to Vitrinite in Some Paleozoic Sequences of Canada. *Energy Sources*, 15(2): 269—287. <https://doi.org/10.1080/00908319308909027>
- Bertrand, R., Héroux, Y., 1987. Chitinozoan, Graptolite, and Scolecodont Reflectance as an Alternative to Vitrinite and Pyrobitumen Reflectance in Ordovician and Silurian Strata, Anticosti Island, Quebec, Canada. *AAPG Bulletin*, 71(8): 951—957. <https://doi.org/10.1306/948878f7-1704-11d7-8645000102c1865d>
- Bertrand, R., Lavoie, D., Fowler, M., 2003. Cambrian-Ordovician Shales in the Humber Zone: Thermal Maturation and Source Rock Potential. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 51(3): 213—233. <https://doi.org/10.2113/51.3.213>
- Bertrand, R., Malo, M., 2001. Source Rock Analysis, Thermal Maturation and Hydrocarbon Generation in Siluro-Devonian Rocks of the Gaspé Belt Basin, Canada. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 49(2): 238—261. <https://doi.org/10.2113/49.2.238>
- Bertrand, R., Malo, M., 2012. Dispersed Organic Matter Reflectance and Thermal Maturation in Four Hydrocarbon Exploration Wells in the Hudson Bay Basin: Regional Implications. *Geological Survey of Canada Open File*, 7066: 1—52. <https://doi.org/10.4095/289709>
- Buchardt, B., Lewan, M. D., 1990. Reflectance of Vitrinite-Like Macerals as a Thermal Maturity Index for Cambrian-Ordovician Alum Shale, Southern Scandinavia. *AAPG Bulletin*, 74: 394—406. <https://doi.org/10.1306/0c9b230d-1710-11d7-8645000102c1865d>
- Cao, C. Q., Shang, Q. H., Fang, Y. T., 2000. The Study of Graptolite Reflectance as the Indicator of Source Rock Maturation in Ordovician and Silurian of Tarim Basin, Ordos, Jiangsu Areas. *Acta Palaeontologica Sinica*, 39(1): 151—156 (in Chinese with English abstract).
- Chen, X., Rong, J. Y., Mitchell, C. E., et al., 2000. Late Ordovician to Earliest Silurian Graptolite and Brachiopod Biozonation from the Yangtze Region, South China, with a Global Correlation. *Geological Magazine*, 137(6): 623—650. <https://doi.org/10.1017/s0016756800004702>
- Cheng, D. S., Hao, S. S., Wang, F. Y., 1995. Reflectance of Vitrinite-Like Macerals, a Possible Thermal Maturity Index for Highly Over-Matured Source Rocks of the Lower Paleozoic. *Petroleum Exploration and Development*, 22(1): 25—28 (in Chinese with English abstract).
- Colțoi, O., Nicolas, G., Safa, P., 2016. The Assessment of the Hydrocarbon Potential and Maturity of Silurian Intervals from Eastern Part of Moesian Platform-Romanian Sector. *Marine and Petroleum Geology*, 77: 653—667. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.06.024>
- Dai, J. X., Zou, C. N., Dong, D. Z., et al., 2016. Geochemical Characteristics of Marine and Terrestrial Shale Gas in China. *Marine and Petroleum Geology*, 76: 444—463. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.04.027>
- Dai, J. X., Zou, C. N., Liao, S. M., et al., 2014. Geochemistry of the Extremely High Thermal Maturity Longmaxi Shale Gas, Southern Sichuan Basin. *Organic Geochemistry*, 74: 3—12. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2014.01.018>
- Feng, G. X., Chen, S. J., 1988. Relationship between the Reflectance of Bitumen and Vitrinite in Rock. *Natural Gas Industry*, 8(3): 20—25 (in Chinese with English abstract).
- Ferreiro Mählmann, R., Frey, M., 2012. Standardisation, Calibration and Correlation of the Kübler-Index and the Vitrinite/Bituminite Reflectance: An Inter-Laboratory and Field Related Study. *Swiss Journal of Geosciences*, 105(2): 153—170. <https://doi.org/10.1007/s00015-012-0110-8>
- Gentzis, T., Freitas, T. D., Goodarzi, F., et al., 1996. Thermal Maturity of Lower Paleozoic Sedimentary Successions in Arctic Canada. *AAPG Bulletin*, 80(7): 1065—1084. [https://doi.org/10.1016/s0264-8172\(96\)00028-1](https://doi.org/10.1016/s0264-8172(96)00028-1)
- Goodarzi, F., Gentzis, T., Harrison, C., et al., 1992. The Significance of Graptolite Reflectance in Regional Thermal Maturity Studies, Queen Elizabeth Islands, Arctic Canada. *Organic Geochemistry*, 18(3): 347—357. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(92\)90075-9](https://doi.org/10.1016/0146-6380(92)90075-9)
- Goodarzi, F., Norford, B. S., 1985. Graptolites as Indicators of the Temperature Histories of Rocks. *Journal of the Geological Society*, 142(6): 1089—1099. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.142.6.1089>
- Grobe, A., Urai, J. L., Littke, R., et al., 2016. Hydrocarbon Generation and Migration under a Large Overthrust: The Carbonate Platform under the Semial Ophiolite,

- Jebel Akhdar, Oman. *International Journal of Coal Geology*, 168: 3—19. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2016.02.007>
- Guo, T.L., 2013. Evaluation of Highly Thermally Mature Shale-Gas Reservoirs in Complex Structural Parts of the Sichuan Basin. *Journal of Earth Science*, 24(6): 863—873. <https://doi.org/10.1007/s12583-013-0384-4>
- Guo, T. L., Zhang, H. R., 2014. Formation and Enrichment Mode of Jiaoshiba Shale Gas Field, Sichuan Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 41(1): 28—36 (in Chinese with English abstract).
- Hackley, P.C., Cardott, B.J., 2016. Application of Organic Petrography in North American Shale Petroleum Systems: A Review. *International Journal of Coal Geology*, 163: 8—51. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2016.06.010>
- Haeri-Ardakani, O., Sanei, H., Lavoie, D., et al., 2015. Geochemical and Petrographic Characterization of the Upper Ordovician Utica Shale, Southern Quebec, Canada. *International Journal of Coal Geology*, 138: 83—94. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2014.12.006>
- Hao, F., Zou, H.Y., Lu, Y.C., 2013. Mechanisms of Shale Gas Storage: Implications for Shale Gas Exploration in China. *AAPG Bulletin*, 97(8): 1325—1346. <https://doi.org/10.1306/02141312091>
- Hartkopf-Fröder, C., Königshof, P., Little, R., et al., 2015. Optical Thermal Maturity Parameters and Organic Geochemical Alteration at Low Grade Diagenesis to Anchime Tamorphism: A Review. *International Journal of Coal Geology*, 150-151: 74—119. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2015.06.005>
- He, D.F., Li, D.S., Zhang, G.W., et al., 2011. Formation and Evolution of Multi-Cycle Superposed Sichuan Basin, China. *Chinese Journal of Geology*, 46(3): 589—606 (in Chinese with English abstract).
- Jacob, H., 1989. Classification, Structure, Genesis and Practical Importance of Natural Solid Oil Bitumen (“Migrabitumen”). *International Journal of Coal Geology*, 11(1): 65—79. [https://doi.org/10.1016/0166-5162\(89\)90113-4](https://doi.org/10.1016/0166-5162(89)90113-4)
- Jiang, Q., Qiu, N.S., Zhu, C.Q., 2018. Heat Flow Study of the Emeishan Large Igneous Province Region: Implications for the Geodynamics of the Emeishan Mantle Plume. *Tectonophysics*, 724—725: 11—27. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.12.027>
- Jin, Z.J., Hu, Z.Q., Gao, B., et al., 2016. Controlling Factors on the Enrichment and High Productivity of Shale Gas in the Wufeng-Longmaxi Formations, Southeastern Sichuan Basin. *Earth Science Frontiers*, 23(1): 1—10 (in Chinese with English abstract).
- Landis, C. R., Castaño, J. R., 1995. Maturation and Bulk Chemical Properties of a Suite of Solid Hydrocarbons. *Organic Geochemistry*, 22(1): 137—149. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(95\)90013-6](https://doi.org/10.1016/0146-6380(95)90013-6)
- Li, X. Q., Zhang, J. Z., Wang, Y., et al., 2016. Accumulation Conditions of Lower Paleozoic Shale Gas from the Southern Sichuan Basin, China. *Journal of Natural Gas Geoscience*, 1(2): 101—108. <https://doi.org/10.1016/j.jnggs.2016.05.007>
- Liang, D.G., Guo, T. L., Chen, J. P., et al., 2008. Some Progresses on Studies of Hydrocarbon Generation and Accumulation in Marine Sedimentary Regions, Southern China (Part 1): Distribution of Four Suits of Regional Marine Source Rocks. *Marine Origin Petroleum Geology*, 13(2): 1—16 (in Chinese with English abstract).
- Link, C.M., Bustin, R.M., Goodarzi, F., 1990. Petrology of Graptolites and Their Utility as Indices of Thermal Maturity in Lower Paleozoic Strata in Northern Yukon, Canada. *International Journal of Coal Geology*, 15 (2): 113—135. [https://doi.org/10.1016/0166-5162\(90\)90007-1](https://doi.org/10.1016/0166-5162(90)90007-1)
- Liu, D. H., Shi, J. Y., 1994. Discussion on Unconventional Evaluation Method of High Maturity Carbonate Source Rocks. *Petroleum Exploration and Development*, 21(3): 113—115 (in Chinese).
- Liu, S.G., Deng, B., Jansa, L., et al., 2018. Multi-Stage Basin Development and Hydrocarbon Accumulations: A Review of the Sichuan Basin at Eastern Margin of the Tibetan Plateau. *Journal of Earth Science*, 29(2): 307—325. <https://doi.org/10.1007/s12583-017-0904-8>
- Liu, S.G., Deng, B., Zhong, Y., et al., 2016. Unique Geological Features of Burial and Superimposition of the Lower Paleozoic Shale Gas across the Sichuan Basin and Its Periphery. *Earth Science Frontiers*, 23(1): 11—28 (in Chinese with English abstract).
- Liu, W.B., Qin, J. Z., Meng, Q. Q., et al., 2008. Reflectance and Content of Sulfur Character of Bitumen in the Feixianguan-Changxing Formation, Northeastern Sichuan. *Acta Geologica Sinica*, 82(3): 373—379 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z.F., Xiao, X. M., Fu, J. M., et al., 1999. Marine Vitrinite Reflectance as a Maturity Indicator of Lower Palaeozoic Hydrocarbon Source Rocks. *Geochimica*, 28 (6): 580—588 (in Chinese with English abstract).
- Loucks, R. G., Reed, R. M., Ruppel, S. C., et al., 2009. Morphology, Genesis, and Distribution of Nanometer-Scale Pores in Siliceous Mudstones of the Mississippian Barnett Shale. *Journal of Sedimentary Research*, 79(12):

- 848—861.<https://doi.org/10.2110/jsr.2009.092>
- Lüning, S., Craig, J., Loydell, D. K., et al., 2000. Lower Silurian ‘Hot Shales’ in North Africa and Arabia: Regional Distribution and Depositional Model. *Earth-Science Reviews*, 49(1-4): 121—200.[https://doi.org/10.1016/s0012-8252\(99\)00060-4](https://doi.org/10.1016/s0012-8252(99)00060-4)
- Luo, Q. Y., Hao, J. Y., Skovsted, C. B., et al., 2017. The Organic Petrology of Graptolites and Maturity Assessment of the Wufeng-Longmaxi Formations from Chongqing, China: Insights from Reflectance Cross-Plot Analysis. *International Journal of Coal Geology*, 183: 161—173.<https://doi.org/10.1016/j.coal.2017.09.006>
- Luo, Q. Y., Zhong, N. N., Dai, N., et al., 2016. Graptolite-Derived Organic Matter in the Wufeng-Longmaxi Formations (Upper Ordovician-Lower Silurian) of Southeastern Chongqing, China: Implications for Gas Shale Evaluation. *International Journal of Coal Geology*, 153: 87—98. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2015.11.014>
- Malinconico, M. A. L., 1993. Reflectance Cross-Plot Analysis of Graptolites from the Anchi-Metamorphic Region of Northern Maine, U.S.A.. *Organic Geochemistry*, 20(2): 197—207. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(93\)90038-d](https://doi.org/10.1016/0146-6380(93)90038-d)
- Mastalerz, M., Schimmelmann, A., Drobniak, A., et al., 2013. Porosity of Devonian and Mississippian New Albany Shale across a Maturation Gradient: Insights from Organic Petrology, Gas Adsorption, and Mercury Intrusion. *AAPG Bulletin*, 97(10): 1621—1643.<https://doi.org/10.1306/04011312194>
- Mu, C. L., Zhou, K. K., Liang, W., et al., 2011. Early Paleozoic Sedimentary Environment of Hydrocarbon Source Rocks in the Middle-Upper Yangtze Region and Petroleum and Gas Exploration. *Acta Geologica Sinica*, 85(4): 526—532 (in Chinese with English abstract).
- Nie, H. K., Zhang, J. C., Bao, S. J., et al., 2012. Shale Gas Accumulation Conditions of the Upper Ordovician-Lower Silurian in Sichuan Basin and Its Periphery. *Oil & Gas Geology*, 33(3): 335—345 (in Chinese with English abstract).
- Petersen, H. I., Schovsbo, N. H., Nielsen, A. T., 2013. Reflectance Measurements of Zooclasts and Solid Bitumen in Lower Paleozoic Shales, Southern Scandinavia: Correlation to Vitrinite Reflectance. *International Journal of Coal Geology*, 114: 1—18. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2013.03.013>
- Qiu, N. S., Chang, J., Zuo, Y. H., et al., 2012. Thermal Evolution and Maturation of Lower Paleozoic Source Rocks in the Tarim Basin, Northwest China. *AAPG Bulletin*, 96(5): 789—821. <https://doi.org/10.1306/04011312194>
- 09071111029
- Rantitsch, G., 1995. Coalification and Graphitization of Graptolites in the Anchizone and Lower Epizone. *International Journal of Coal Geology*, 27(1): 1—22.[https://doi.org/10.1016/0166-5162\(94\)00017-t](https://doi.org/10.1016/0166-5162(94)00017-t)
- Riediger, C., Goodarzi, F., Macqueen, R. W., 1989. Graptolites as Indicators of Regional Maturity in Lower Paleozoic Sediments, Selwyn Basin, Yukon and Northwest Territories, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 26(10): 2003—2015.<https://doi.org/10.1139/e89-169>
- Riediger, C. L., 1993. Solid Bitumen Reflectance and Rock-Eval T_{max} as Maturation Indices: An Example from the “Nordegg Member”, Western Canada Sedimentary Basin. *International Journal of Coal Geology*, 22(3—4): 295—315. [https://doi.org/10.1016/0166-5162\(93\)90031-5](https://doi.org/10.1016/0166-5162(93)90031-5)
- Sanei, H., Haeri-Ardakani, O., Wood, J. M., et al., 2015. Effects of Nanoporosity and Surface Imperfections on Solid Bitumen Reflectance (BR_0) Measurements in Unconventional Reservoirs. *International Journal of Coal Geology*, 138: 95—102.<https://doi.org/10.1016/j.coal.2014.12.011>
- Schmidt, J. S., Araujo, C. V., Souza, I. V. A. F., et al., 2015. Hydrous Pyrolysis Maturation of Vitrinite-Like and Humic Vitrinite Macerals: Implications for Thermal Maturity Analysis. *International Journal of Coal Geology*, 144-145: 5—14.<https://doi.org/10.1016/j.coal.2015.03.016>
- Schoenherr, J., Little, R., Urai, J. L., et al., 2007. Polyphase Thermal Evolution in the Infra-Cambrian Ara Group (South Oman Salt Basin) as Deduced by Maturity of Solid Reservoir Bitumen. *Organic Geochemistry*, 38(8): 1293—1318. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2007.03.010>
- Suárez-Ruiz, I., Flores, D., Mendonça Filho, J. G., et al., 2012. Review and Update of the Applications of Organic Petrology: Part 1, Geological Applications. *International Journal of Coal Geology*, 99: 54—112.<https://doi.org/10.1016/j.coal.2012.02.004>
- Suchý, V., Sýkorová, I., Stejskal, M., et al., 2002. Dispersed Organic Matter from Silurian Shales of the Barrandian Basin, Czech Republic: Optical Properties, Chemical Composition and Thermal Maturity. *International Journal of Coal Geology*, 53(1): 1—25.[https://doi.org/10.1016/s0166-5162\(02\)00137-4](https://doi.org/10.1016/s0166-5162(02)00137-4)
- Tenger, T., Shen, B. J., Yu, L. J., et al., 2017. Mechanisms of Shale Gas Generation and Accumulation in the Ordovician Wufeng-Longmaxi Formation, Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 44(1): 69—78 (in Chinese with English abstract).

- Tissot, B. P., Welte, D. H., 1984. Petroleum Formation and Occurrence. Springer-Verlag, Berlin.
- Tricker, P. M., 1992. Chitinozoan Reflectance in the Lower Palaeozoic of the Welsh Basin. *Terra Nova*, 4(2):231—237. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.1992.tb00477.x>
- Wang, F. Y., He, P., Chen, D. S., et al., 1996. Take Vitrinite-Like Reflectance as the Maturity Indicator for Lower Paleozoic High-Overmature Source Rock. *Natural Gas Industry*, 16(4):14—18 (in Chinese).
- Xiao, X. M., Liu, D. H., Fu, J. M., et al., 1991. The Significance of Bitumen Reflectance as a Mature Parameter of Source Rocks. *Acta Sedimentologica Sinica*, 9 (S1): 138—146 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, X. M., Wilkins, R. W. T., Liu, D. H., et al., 2000. Investigation of Thermal Maturity of Lower Palaeozoic Hydrocarbon Source Rocks by Means of Vitrinite-Like Maceral Reflectance—A Tarim Basin Case Study. *Organic Geochemistry*, 31(10): 1041—1052. [https://doi.org/10.1016/s0146-6380\(00\)00061-9](https://doi.org/10.1016/s0146-6380(00)00061-9)
- Xie, X. N., Hao, F., Lu, Y. C., et al., 2017. Differential Enrichment Mechanism and Key Technology of Shale Gas in Complex Areas of South China. *Earth Science*, 42 (7): 1045—1056 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.084>
- Yang, C., Hesse, R., 1993. Diagenesis and Anchimetamorphism in an Overthrust Belt, External Domain of the Taconian Orogen, Southern Canadian Appalachians—II. Paleogeothermal Gradients Derived from Maturation of Different Types of Organic Matter. *Organic Geochemistry*, 20(3): 381—403. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(93\)90127-w](https://doi.org/10.1016/0146-6380(93)90127-w)
- Yang, Y. F., 2016. Application of Bitumen and Graptolite Reflectance in the Silurian Longmaxi Shale, Southeastern Sichuan Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 38 (4): 466—472 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, G. Y., Wang, Y. F., Bao, S. J., et al., 2017. Major Factors Controlling the Accumulation and High Productivity of Marine Shale Gas and Prospect Forecast in Southern China. *Earth Science*, 42(7): 1057—1068 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.085>
- Zhang, T. W., Ellis, G. S., Ruppel, S. C., et al., 2012. Effect of Organic-Matter Type and Thermal Maturity on Methane Adsorption in Shale-Gas Systems. *Organic Geochemistry*, 47: 120—131. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2012.03.012>
- Zhu, C. Q., Hu, S. B., Qiu, N. S., et al., 2018. Geothermal Constraints on Emeishan Mantle Plume Magmatism: Paleotemperature Reconstruction of the Sichuan Basin, SW China. *International Journal of Earth Sciences*, 107(1): 71—88. <https://doi.org/10.1007/s00531-016-1404-2>
- Zhu, C. Q., Rao, S., Yuan, Y. S., et al., 2013. Thermal Evolution of the Main Paleozoic Shale Rocks in the Southeastern Sichuan Basin. *Journal of China Coal Society*, 38(5): 834—839 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Y. H., Yang, X. Q., Yin, L., et al., 1998. Study of Reflectance for the Graptolites from Lower Yangtze Region in Jiangsu, E China. *Acta Palaeontologica Sinica*, 37(3): 354—358 (in Chinese with English abstract).
- Zou, C. N., Yang, Z., Dai, J. X., et al., 2015. The Characteristics and Significance of Conventional and Unconventional Sinian-Silurian Gas Systems in the Sichuan Basin, Central China. *Marine and Petroleum Geology*, 64: 386—402. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.03.005>
- ### 附中文参考文献
- 曹长群,尚庆华,方一亭,2000.探讨笔石反射率对奥陶系、志留系烃源岩成熟度的指示作用.古生物学报,39(1): 151—156.
- 程顶胜,郝石生,王飞宇,1995.高过成熟烃源岩成熟度指标——镜状体反射率.石油勘探与开发,22(1):25—28.
- 丰国秀,陈盛吉,1988.岩石中沥青反射率与镜质体反射率之间的关系.天然气工业,8(3):20—25.
- 郭彤楼,张汉荣,2014.四川盆地焦石坝页岩气田形成与富集高产模式.石油勘探与开发,41(1):28—36.
- 何登发,李德生,张国伟,等,2011.四川多旋回叠合盆地的形成与演化.地质科学,46(3):589—606.
- 金之钧,胡宗全,高波,等,2016.川东南地区五峰组—龙门溪组页岩气富集与高产控制因素.地学前缘,23(1): 1—10.
- 梁狄刚,郭彤楼,陈建平,等,2008.中国南方海相生烃成藏研究的若干新进展(一)南方四套区域性海相烃源岩的分布.海相油气地质,13(2):1—16.
- 刘德汉,史继扬,1994.高演化碳酸盐烃源岩非常规评价方法探讨.石油勘探与开发,21(3):113—115.
- 刘树根,邓宾,钟勇,等,2016.四川盆地及周缘下古生界页岩气深埋藏—强改造独特地质作用.地学前缘,23(1): 11—28.
- 刘文斌,秦建中,孟庆强,等,2008.川东北地区飞仙关组—长兴组储层沥青反射率及含硫量特征.地质学报,82(3): 373—379.
- 刘祖发,肖贤明,傅家摸,等,1999.海相镜质体反射率用作早古生代烃源岩成熟度指标研究.地球化学,28(6): 580—588.
- 牟传龙,周恩恩,梁薇,等,2011.中上扬子地区早古生代烃源

- 岩沉积环境与油气勘探.地质学报,85(4):526—532.
- 聂海宽,张金川,包书景,等,2012.四川盆地及其周缘上奥陶统一下志留统页岩气聚集条件.石油与天然气地质,33(3):335—345.
- 腾格尔,申宝剑,俞凌杰,等,2017.四川盆地五峰组—龙门溪组页岩气形成与聚集机理.石油勘探与开发,44(1):69—78.
- 王飞宇,何萍,程顶胜,等,1996.镜状体反射率可作为下古生界高过成熟烃源岩成熟度标尺.天然气工业,16(4):14—18.
- 肖贤明,刘德汉,傅家模,1991.沥青反射率作为烃源岩成熟度指标的意义.沉积学报,9(S1):138—146.

- 解习农,郝芳,陆永潮,等,2017.南方复杂地区页岩气差异富集机理及其关键技术.地球科学,42(7):1045—1056.
<https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.084>
- 仰云峰,2016.川东南志留系龙门溪组页岩沥青反射率和石油反射率的应用.石油实验地质,38(4):466—472.
- 翟刚毅,王玉芳,包书景,等,2017.我国南方海相页岩气富集高产主控因素及前景预测.地球科学,42(7):1057—1068.
<https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.085>
- 朱传庆,饶松,袁玉松,等,2013.川东南地区古生界主要页岩层系热演化.煤炭学报,38(5):834—839.
- 祝幼华,杨晓清,尹玲,等,1998.江苏下扬子区笔石反射率研究.古生物学报,37(3):354—358.

《地球科学》

2019年4月 第44卷 第4期 要目预告

- | | |
|--|------|
| 造山带橄榄岩岩石学与构造过程:以松树沟橄榄岩为例..... | 张宏福等 |
| 华北古元古代碳酸岩起源深度及现代板块构造启动 | 许成等 |
| 造山带橄榄岩中锆石的成因及其地质意义 | 郑建平等 |
| 中国东北软流圈地幔中的原始橄榄岩质地幔 | 薛笑秋等 |
| 地幔橄榄岩中碳酸盐熔体交代作用及其鉴定特征 | 邓黎旭等 |
| 俯冲带岩浆作用与大陆地壳生长 | 马超等 |
| 中国东南部晚中生代基性岩脉地幔源区的岩性演化历史 | 雷祝梁等 |
| 大兴安岭北段中—新生代玄武岩成分变异:对地幔热演化过程意义 | 唐杰等 |
| 江山—绍兴构造带陈蔡岩群斜长角闪岩变质时代、地球化学特征及其构造演化意义 | 陈林燊等 |
| 内蒙古博克图晶洞花岗岩形成时代、特征及其地质意义 | 秦锦华等 |